

# 省合金型高強度はだ焼鋼

High strength carburizing steel based on Ni, Mo-free alloy

中名 悟\*1 後藤洋昭\*2 西川元裕\*3 常陰典正\*4

Satoru Nakamyo, Hiroaki Goto, Motohiro Nishikawa and Norimasa Tsunekage

## 1. はじめに

自動車のギヤ等の動力伝達部品用鋼には、耐摩耗性や疲労強度向上を目的に浸炭焼入焼戻しを施して使用するはだ焼鋼が広く用いられている。近年、地球温暖化が深刻な問題となっており、CO<sub>2</sub>排出量削減のための燃費向上を目的に、自動車部品の高強度化による小型・軽量化ニーズが高まっており、はだ焼鋼にも高強度化が強く求められている。

自動車のギヤにおける主要な破損形態としては、歯元の曲げ疲労破壊と歯面の面疲労（ピッチング）が挙げられる。以前はギヤの破損は主として歯元の曲げ疲労破壊であったが、ショットピーニングの適用<sup>1,2)</sup> によって歯元の曲げ疲労強度が飛躍的に向上したことにより、ギヤの破損は歯面のピッチングが主体になってきている。また、燃費向上の観点から動力伝達ロス低減のために潤滑油は低粘度化する傾向にあり、ますますギヤ歯面のピッチング強度が要求されている。

はだ焼鋼の高強度化には、一般的に、Mo、Niなどの合金元素を添加する手法が用いられているが、これらの合金元素の添加は、部品成形時の加工性の悪化、コストアップなどの問題がある。特に近年の合金元素においては、価格の不安定性や将来的な資源枯渇などが問題となっており、コスト変動が小さく供給不安の少ない合金元素を選定して高強度化を行うことが求められている。

このような背景の中、当社では省合金型の耐ピッチング特性に優れる高強度はだ焼鋼を開発した。本報では、本鋼種の成分設計のコンセプトと的確な材料方策をとるために行ったピッチング強度向上策の検討結果、ならびに開発した省合金型の高強度はだ焼鋼の特性評価結果と考察を報告する。

## 2. 成分設計のコンセプト

物質材料研究機構の理論<sup>3)</sup> を基に、統計データを用いて

作成した資源枯渇加速指数と調達リスクの概念図をFig.1に示す。資源枯渇加速指数は、各元素の地殻存在度、埋蔵量、消費量から求めた数値であり、その金属資源1tの使用が、鉄資源の何t分の使用に相当する資源枯渇であるかを表す。一方、調達リスクは最大鉱山生産国のシェアと、過去数年間の平均価格と最大価格の比から求めた数値であり、資源の偏在に加え、価格変動の要因が含まれており、経済性も含んだ指標となっている。したがって、図中の左下に位置する元素は有効活用すべき元素であり、右上に位置する元素は代替、低減、リサイクルすべき元素である。構造用鋼の高強度化のために一般的に添加されるMoやNiなどは、特殊鋼の主要元素であるCrやSi、Mnなどの合金元素と比較して、資源枯渇加速指数が高く、特にMoにおいては調達リスクも高いことになる。

したがって、省合金型高強度はだ焼鋼としては、MoやNiを添加せずに、Si、Cr、Mn等の成分バランスで高強度化と加工性の両立を実現させることを開発のコンセプトにした。

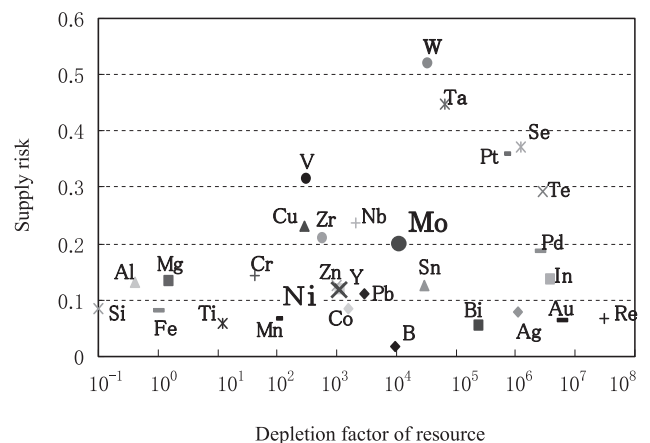


Fig.1 Relationship between depletion factor of resource and supply risk.

\*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ  
 \*2 製鋼部 第一製鋼課、前 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ  
 \*3 軸受営業部 軸受CS室、元 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ  
 \*4 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ長、博士 (工学)

### 3. ピッチング強度向上策の検討

ギヤのピッチング強度向上のための合理的な材料設計方策を見出すためには、ピッチング強度向上の指標を明確にすることが必須課題である。そこで、まずはピッチング強度向上策について検討を行った。

#### 3.1 ピッチングモデル

Fig.2に平板上をボールが転がる際の接触面にすべりが無い場合とすべりがある場合のせん断応力分布と発生き裂の模式図を示す。まず (a) に示すように接触面にすべりが無い場合、すなわち軸受のような純転がりによる接触負荷において、面圧Pによるせん断応力はヘルツ理論により表面直下で最大になり、表面のせん断応力はゼロである。そのため、表面ではき裂が発生せず、内部のせん断応力が最大になる位置付近で、例えば非金属介在物等の欠陥を起点にき裂が生成し、そのき裂が伝ばして表面に至ったところではく離が生じることが知られている<sup>4)</sup>。

一方、表面にすべりがある場合、(b) に示すように面圧Pに加え、接線力(摩擦力): $W (= \mu P)$  も作用する。接線力Wにより生成するせん断応力は表面を最大とし、深さが増すに従って急激に低下する。その結果、表面直下には面圧Pによるせん断応力と接線力Wによるせん断応力の合力が働く。接線力が大きくなると表面のせん断応力が最大となり、表面からき裂が生成し、そのき裂が伝ばしてはく離、すなわちピッチングに至ると考えられる。すべりがある場合のせん断応力分布についてはCAE解析によっても検証されている<sup>5)</sup>。

上述のモデルから、接線力がピッチング発生の指標になると考えられ、ピッチング強度向上には接線力を低下させ

ることが有効であると考えられる。

#### 3.2 浸炭異常層に着眼した耐ピッチング特性の向上

Fig.3はSCM420をベースとして、Si量を0.06mass%、0.11mass%、0.21mass%、0.50mass%に変化させた材料を用いたガス浸炭品のローラーピッチング試験結果である。試験片である小ローラーは、試験片加工後に浸炭焼入焼戻し(浸炭温度:1203K、焼入温度:1103K、焼戻温度:453K)を施し、掴み部のみについて仕上げ加工を施して試験に供した。大ローラーと小ローラーの接触面圧は340kgf/mm<sup>2</sup>ですべり率は-40%として、小ローラーの表面がはく離するまでの応力繰返し数にて評価した。Si量が0.21mass%まではローラーピッチング寿命に大きな変化はないが、0.50mass%では大きく向上している。

Siを0.50mass%まで増量した材料が長寿命であった要因の一つは、従来からの知見である高Siによる焼戻軟化抵抗特性の向上である<sup>6,7)</sup>。すなわち、すべりによってギヤの表面は局部的に温度上昇して軟化するが、高Si化によってこれが抑制されたと考えられる。さらに、著者らは、以下の理由により、浸炭異常層の性状にも大きく影響したものと推定した<sup>8)</sup>。Fig.4はSCM420をベースとして0.02mass%から1.02mass%までSi量を変化させた場合のガス浸炭後の浸炭異常層の観察写真であり、Fig.5はSi量と浸炭異常層深さの関係である。Si量が0.2%までは、Si増量により浸炭異常層深さは増すが、さらにSi量が増えると逆に減少し、0.50mass%以上で一定深さになる。ただし、この高Si材の浸炭異常層は、低Si材のそれと比較して、濃く腐食されて緻密に観察されることが特徴である。一般に浸炭異常層は、粒界酸化層とそれに伴って合金が減少したことによって生じる不完全焼入層によって構成されており、正常な浸

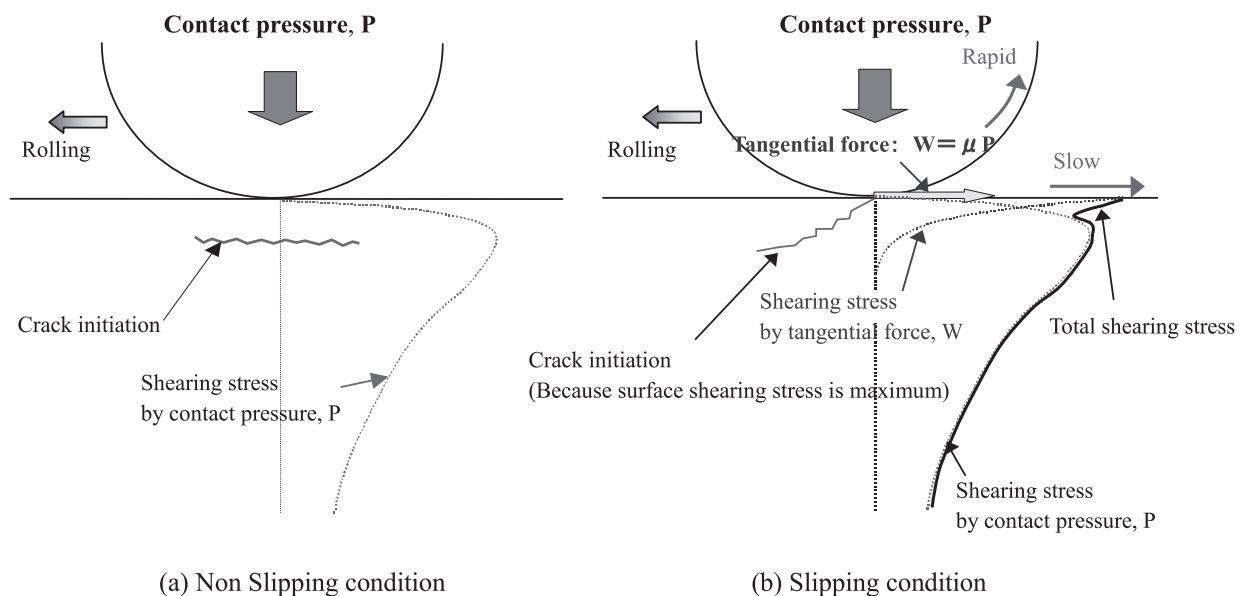


Fig.2 Schematic of relationship between shearing stress distribution and crack initiation.

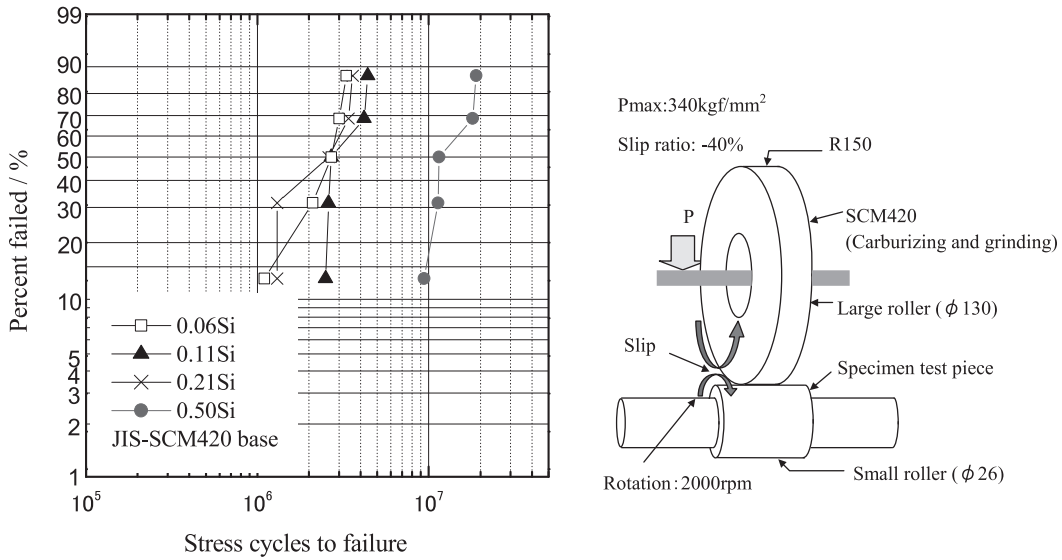


Fig.3 Influence of Si contents on roller pitting life.

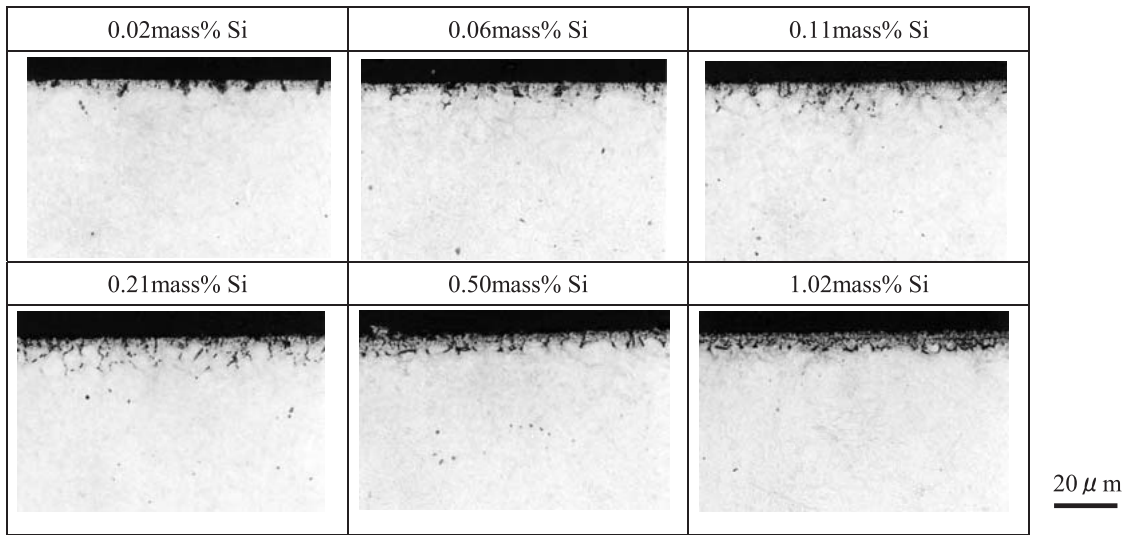


Fig.4 Optical microstructures of intergranular oxides and partially hardened structure caused by gas-carburizing.

炭層のマルテンサイトと比較すると硬さなどの強度特性が低下することが知られている<sup>9)</sup>。したがって、浅い浸炭異常層は疲労によるき裂生成の点から有利であると考えられ、さらに表面全体に緻密に広がった浸炭異常層は、試験期間の極初期に塑性変形と摩耗によって接触面のなじみが進行し易く、試験片表面に存在する微小突起間干渉を抑制することにより接線力を低下させると考えられる。鈴木<sup>10)</sup>らは浸炭異常層がピッチング疲労強度に対する影響を調査しており、浸炭異常層が存在する場合や初期粗さが大きい場合でも摩耗などにより最終粗さは小さくなり、この最終粗さがピッチング強度とよい相関があることを示している。

このことから、ピッチング強度の向上には接触表面のなじみに優れた材料が有効であると考えられ、浸炭鋼においては、Si増量などで表面の浸炭異常層を浅く、緻密にすることが有効であると考えられる。

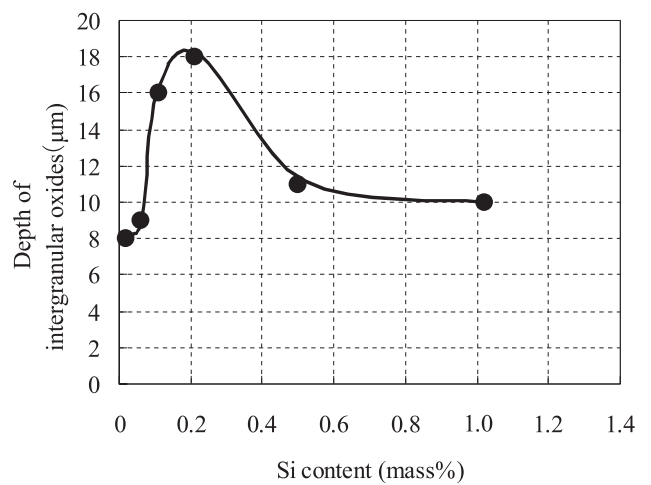


Fig.5 Relationship between Si content and depth of intergranular oxides layer.

## 4. 省合金型高強度はだ焼鋼の諸特性

### 4.1 化学成分

2項で示した成分設計コンセプトならびに3項で示したピッチング強度向上策の検討結果からNi、Moを添加しない高Si、高Cr型の省合金型はだ焼鋼 Steel Aを開発した。Steel Aの化学成分をJIS-SCM420と併せてTable1に示す。耐ピッチング特性の向上のためSiは0.5%まで増量した。Siと同様に焼戻軟化抵抗を向上させるCrはSCM420よりも増量した。Mnは結晶粒度特性の向上<sup>11)</sup>、ならびに加工性確保の観点から低減した。衝撃値及び低サイクル疲労強度の向上を図るためにBを添加<sup>12,13)</sup>し、結晶粒度特性改善のためにNbを添加した。以下にSteel Aの諸特性として、耐ピッチング特性、低サイクル疲労特性、衝撃特性及び焼なまし材の冷間加工性、被削性について紹介する。

### 4.2 耐ピッチング特性

前述のように、ギヤ用鋼に求められる特性の中でも、近年特に耐ピッチング特性が重要視されている。そこで、まずSteel Aの耐ピッチング特性をローラーピッチング試験でSCM420と比較した。試験片の作製方法と試験条件は、3項で示したローラーピッチング試験と同条件である。その結果をFig.6に示すように、Steel AはSCM420と比較して長寿命となっており、50%累積破損確率寿命はSCM420対比で5.8倍であり大きく向上した。このように、ローラーピッチング寿命が上昇した要因を調べるため、以下に焼戻軟化抵抗と浸炭異常層の観察及び接線力の調査結果を示す。

まず、Fig.7にSteel AとSCM420の焼戻軟化抵抗特性を示す。焼戻軟化抵抗は、浸炭焼入後の焼戻温度を変化させ、各温度で2hr保持した後の表面から0.1mmの硬さを測

Table 1 Chemical compositions of specimens.

	(mass%)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Others
Steel A	0.18	0.5	0.3	2.1	Free	Free	Nb, B added
JIS-SCM420	0.20	0.3	0.8	1.1	0.10	0.21	-

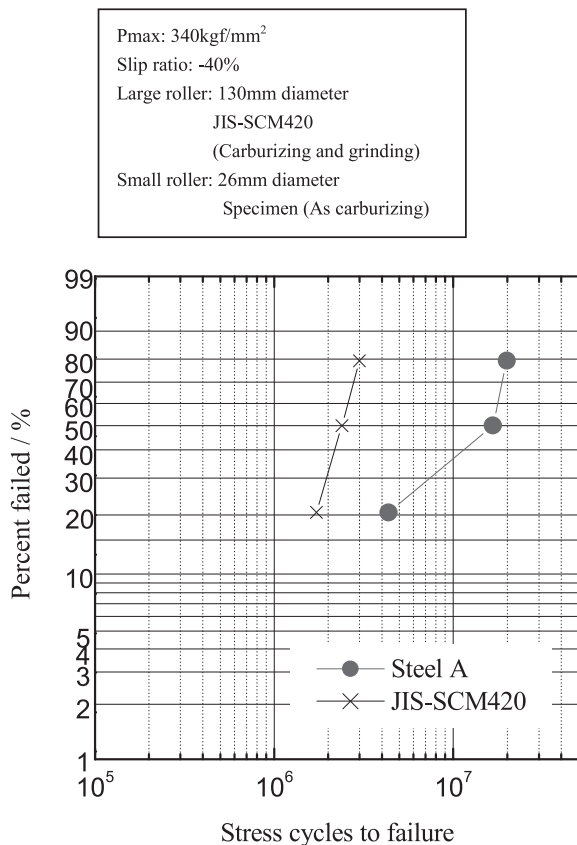


Fig.6 Roller pitting test result of developed steel.

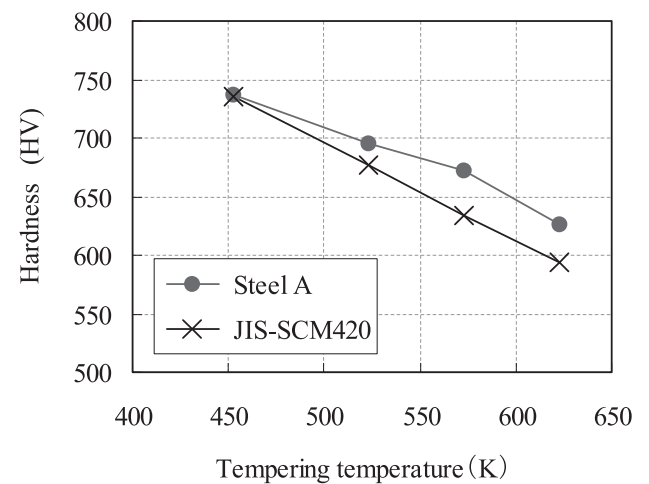


Fig.7 Relationship between temper temperature and hardness of gas-carburized specimens.

定して評価した。Steel AはSCM420に対し焼戻軟化抵抗特性に優れ、573K焼戻硬さでSCM420よりも35HV程度高くなっている。

次に、Fig.8にSteel A及びSCM420の浸炭異常層観察結果を示す。SCM420は深く、シャープな粒界酸化層を形成しているのに対し、Steel Aの浸炭異常層は浅く、表面全体に密に拡がった異常層の形態を示している。Fig.9にローラーピッチング試験による接線力のモニタリング結果を示す。Steel AとSCM420とも試験開始直後は、所定の試験荷重が負荷される $3.0 \times 10^2$ サイクルまで接線力は増加するが、その後接線力は低下する。この間に浸炭異常層内での摩耗進行が認められており、初期摩耗すなわち“なじみ”が進行しているものと推定される。 $2.0 \times 10^4$ サイクル時点でのSteel Aの接線力はSCM420と比較して70N程度低くなっており、その後の軌道面の粗さ変化によって接線力は変化するが、SCM420よりも低い値を推移している。

このように、Steel Aのピッチング寿命が向上したのは、

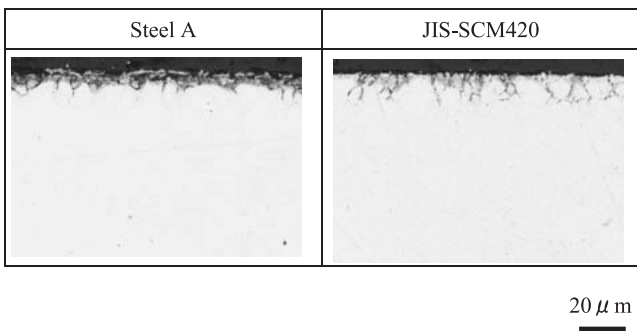


Fig.8 Optical microstructures of intergranular oxides and partially hardened structure caused by gas-carburizing.

焼戻軟化特性の向上に加え、密に全体に拡がった異常層により、試験開始の初期に塑性変形と摩耗により接触面のなじみが進行して、接線力を低下させた効果があったためと考えられる。

#### 4.3 低サイクル疲労特性ならびに衝撃特性

近年では自動車の商品価値向上の観点から、エンジントルクの増大、タイヤの大径化の傾向があり、それに対応するために駆動系の部品にかかる負荷は大きくなっている。発進時には、足回り部品には高負荷応力がかかるため、部品によっては耐ピッチング特性以外に、低サイクル域での疲労強度や衝撃強度についても重要視される。

Fig.10にSteel Aと比較鋼であるSCM420の4点曲げ疲労試験結果を示す。試験片は、角13mm×長さ100mmの3mmVノッチ試験片であり、ノッチ面とその裏面のみ浸炭層を存在させた。浸炭条件は、3.2と同一である。試験は図中に示すように、上下2点支柱ずつで試験片に曲げ荷重を負荷して行い、各荷重において破断するまでのサイ

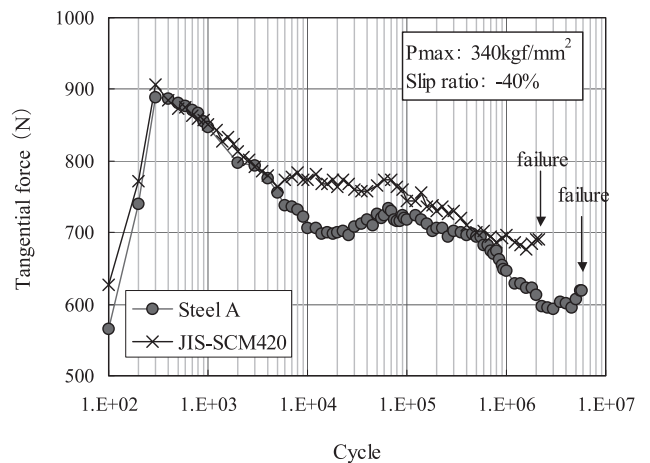


Fig.9 Result of tangential force by roller pitting test.

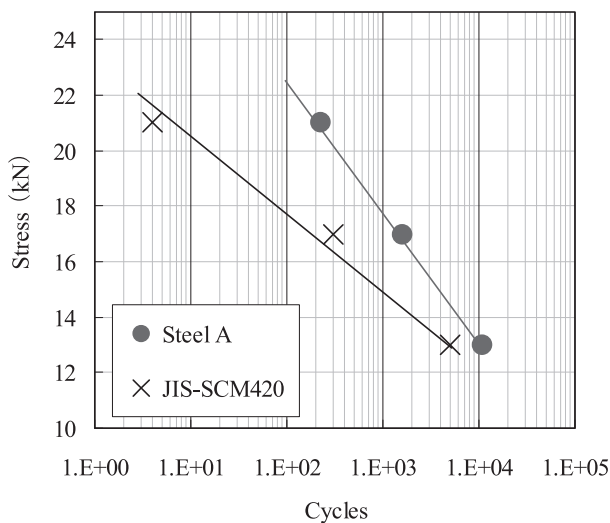
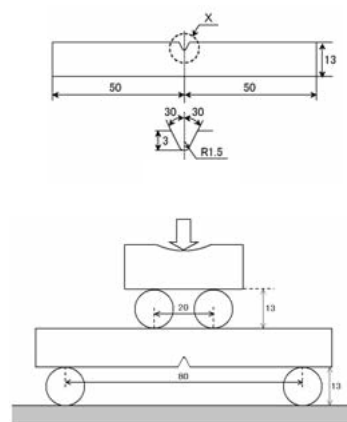


Fig.10 Result of four points bending fatigue test.



クル数を測定した。Steel Aの低サイクル疲労強度は、SCM420と比較して優れており、 $1.0 \times 10^2$ サイクル疲労強度はSCM420対比で25%程度向上した。Fig.11に疲労試験片の破面を示すように、SCM420の起点部は粒界破面主体であるのに対し、Steel Aは擬へき開の粒内破面が主体になっており、B添加による粒界の強化が低サイクル疲労強度向上の一因となったと考えられる。

Fig.12にSteel AとSCM420の旧オーステナイト粒径とシャルピー衝撃値の関係を示す。試験片は、角10×長さ55mmの深さ2mmの10RCノッチ試験片を用いて、粗加工後、浸炭焼入焼戻し（浸炭温度:1203K、焼戻温度:453K）を行った後に側面及び背面について浸炭層を除去した仕上げ加工を施して試験に供した。なお、旧オーステナイト粒径を変化させるために焼入れは1123Kにて最大で3回まで繰り返して行った。Steel A及びSCM420とも旧オーステナイト粒が小さくなるほど衝撃値は向上したが、同一粒径における鋼種間の強度を比較するとSteel Aが優れており、粒径 $10 \mu\text{m}$ では50%以上の衝撃値向上が認められた。また、Fig.13はシャルピー衝撃試験片の破面を示す。

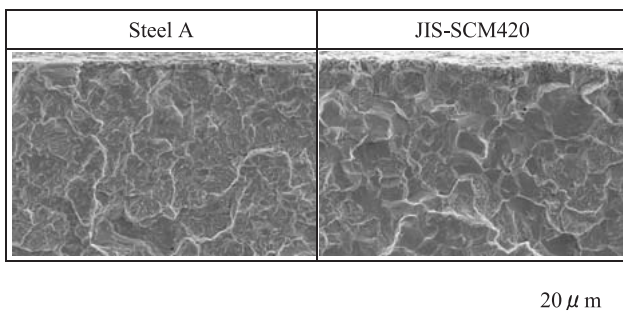


Fig.11 SEM images of fractured surface after four points bending fatigue test.

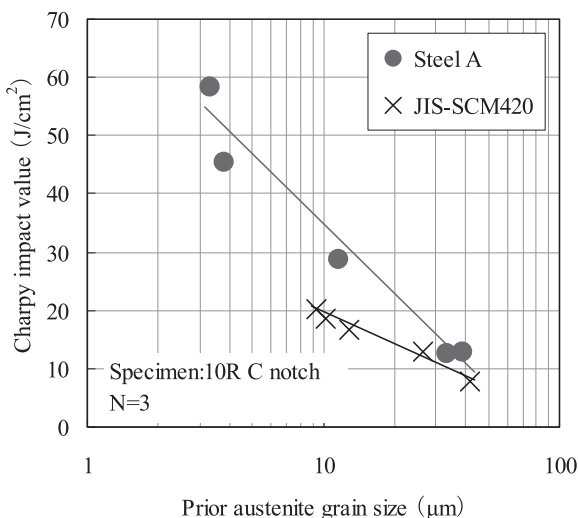


Fig.12 Result of Charpy impact test.

SCM420の起点部は粒界破面を呈しているのに対して、Steel Aでは粒界破面よりも擬へき開破面が主体になっており、低サイクル疲労特性と同様に、B添加による粒界強化により耐衝撃強度が向上したものと考えられる。

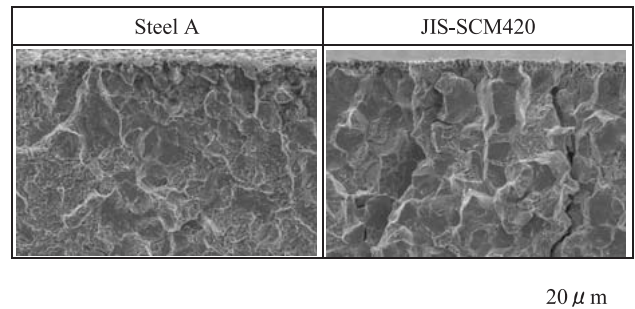


Fig.13 SEM images of fractured surface after Charpy impact specimens.

#### 4.4 焼なまし材の冷間加工性ならびに被削性

NiやMoを使用した一般的な高強度鋼は、一般的なJIS鋼と比較して高強度化は実現出来ても、冷間加工性及び被削性は劣化する傾向にあり、部品製造時のコストアップをもたらす。

Fig.14はSteel Aと比較鋼であるSCM420における焼なまし材の冷間加工性の評価結果である。試験片は、約1073Kから徐冷して得られた焼なまし材から、直径14mm×長さ21mmの試験片を採取して、冷間据え込みを行い、各据え込み率における変形抵抗を測定した。Steel Aの焼なまし材の硬さは約75HRBであり、同条件で焼なましを行ったSCM420と比較して5HRB程度低い。さらに、各据え込み率での変形抵抗も、Steel AはSCM420と比較して低くなった。

Fig.15はSteel AとSCM420の焼なまし材の旋削試験結果である。試験は約1073Kから徐冷却して得られた試験片を用いて、各旋削時間での超硬チップの逃げ面の摩耗量で評価した。Steel Aを旋削した後のチップの摩耗量はSCM420と比較してほぼ同等であった。

このようにSteel Aは高強度にも関わらず、SCM420と比較して、焼なまし後の硬さが低いために、冷間加工性については優れており、被削性については同等である。

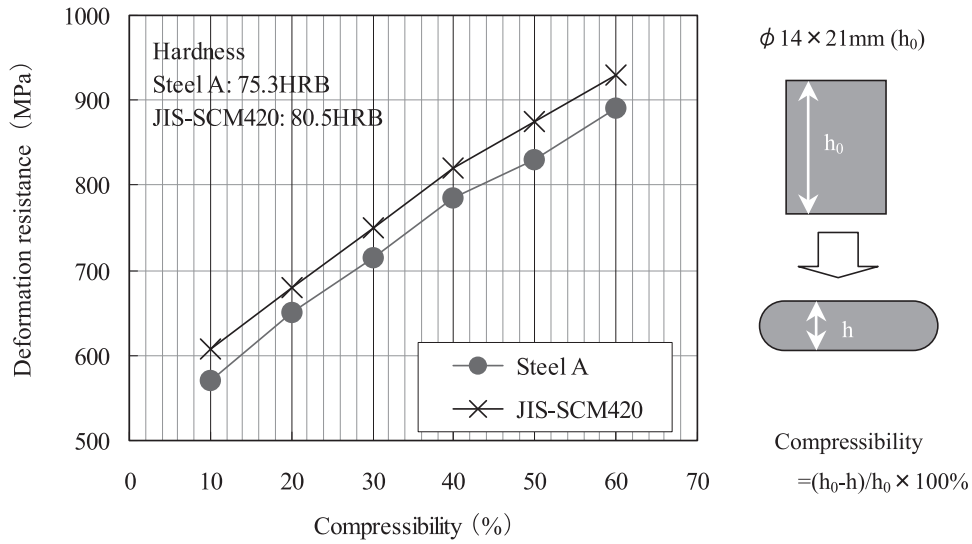


Fig. 14 Relationship between compressibility and deformation resistance of annealed.

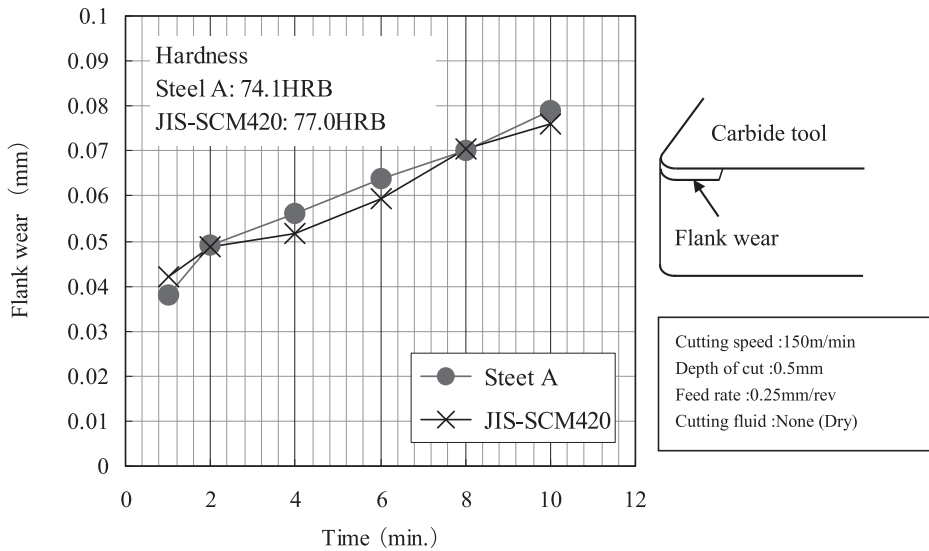


Fig. 15 Relationship between cutting time and flank wear.

## 5. まとめ

NiやMoの添加に頼らず、耐ピッチング特性に優れる省合金型の高強度はだ焼鋼を開発するために、ピッチング強度向上策を検討した結果、Si増量などで表面の浸炭異常層を浅く、緻密にすることで、接触面のなじみを進行させ、接線力を低減する方が有効であることがわかった。これらの考え方をういて成分設計したSteel Aの諸特性は汎用のSCM420と比較して、ピッチング強度の他、衝撃特性、低サイクル曲げ疲労強度も優れ、加工性は同等もしくは優れることを確認した。

## 参考文献

- 1) 久松定興, 金沢孝: 自動車技術, Vol.41(1987), 7, 722.
- 2) 小島芳彦, 須沢昌之, 西村克典, 有見幸夫, 三輪能久: マツダ技報, No.5(1987), 165.
- 3) 原田幸明: 材料と全面代替戦略 ~NIMSにおける取り組みからその可能性を探る~, 独立行政法人 物質・材料研究機構, 5.
- 4) 常陰典正, 橋本和弥, 藤松威史, 平岡和彦: 山陽特殊製鋼技報, Vol.18(2011), 1, 23.
- 5) 木南俊哉, 中村貞行: 電気製鋼, Vol.69(1998), 1, 41.
- 6) 安達裕司, 福田康弘, 笠松千尋, 住田庸: 愛知製鋼技報, Vol.22(2004), 1, 19.

- 7) 坂本和夫,福住達夫,上野英生:三菱製鋼技報,Vol.30 (1996),1.
- 8) 西川元裕:熱処理,Vol.48(2008),3,140.
- 9) 石井伸幸:熱処理,Vol.30(1990),5,240.
- 10) 鈴木智博,小川一善,堀田昇次:日本機械学会論文集, Vol.64(1998),622,2199.
- 11) 藤松威史,橋本和弥:山陽特殊製鋼技報,Vol.17 (2010),1,48.
- 12) 中村貞行,秦野敦臣:電気製鋼,Vol.67(1996),1,4.
- 13) 田中高志:山陽特殊製鋼技報,Vol.10(2003),1,53.